

การซิงโครไนเซชันของการสั่นแบบ Duffing-Holmes ด้วยโครงข่ายประสาทเทียม Synchronization of Duffing-Holmes Oscillators using Neural Networks

ธีรวัฒน์ แสงเพชร * และ สุวัฒน์ กุลชนปรีดา

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและการบิน-อวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
1518 ถนน พิบูลสงคราม เขตบางซื่อ กรุงเทพฯ 10800 โทรศัพท์ 0-2913-2500 โทรสาร 0-2586-9541
*teerawat.me@gmail.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอตัวควบคุมชนิดโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการซิงโครไนเซชันของการสั่นแบบ Duffing-Holmes ซึ่งประกอบด้วยระบบมาสเตอร์และระบบสเลฟ ตัวควบคุมทำหน้าที่ควบคุมระบบสเลฟให้มีพฤติกรรมเหมือนระบบมาสเตอร์ โดยที่ตัวควบคุมมีโครงสร้างเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีชั้นซ่อนภายในหนึ่งชั้น การควบคุมเป็นแบบป้อนกลับทุกสถานะ กระบวนการฝึกสอนตัวควบคุมใช้วิธีแบบจำลองอ้างอิง ผลลัพธ์ของการควบคุมแสดงด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ พบว่าตัวควบคุมสามารถควบคุมให้ระบบสเลฟมีผลตอบสนองเหมือนระบบมาสเตอร์ตามที่ต้องการได้ นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมยังสามารถทำงานได้ดีในกรณีที่ระบบมาสเตอร์ถูกสัญญาณรบกวน

คำหลัก: ตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียม, การสั่นแบบ Duffing-Holmes, ระบบโกลาหล, การซิงโครไนเซชัน

Abstract

This paper presents a neural network controller for synchronization of Duffing-Holmes oscillators which consist of a master system and a slave system. The controller drives the slave system to have the same behavior as the master system. The structure of the controller is feedforward with a hidden layer. The control is full state feedback. The training process of the controller is a model reference approach. Numerical results from computer simulations show that the controller is able to control the states of the slave system to follow the states of the master system as desired. It works when disturbance exists in the master system as well.

Keywords: Neural network controller, Duffing-Holmes Oscillator, Chaotic system, Chaos synchronization

1. บทนำ

การสั่นสะเทือนแบบ Duffing-Holmes เป็นการสั่นแบบไม่เชิงเส้นที่มีพฤติกรรมคล้ายกับว่าไร้ระเบียบและมีความไวต่อค่าเริ่มต้นสูง ถือว่าเป็นคุณสมบัติของระบบโกลาหล (Chaotic system) ซึ่งระบบโกลาหลได้ถูกศึกษามาเป็นระยะเวลาช้านานแล้ว ท่านที่ได้รับการยกย่องว่าเป็นผู้บุกเบิกทฤษฎีระบบโกลาหลคือ Edward Lorenz [1] นักอุตุนิยมวิทยาที่ศึกษาพฤติกรรมของระบบโกลาหลผ่านการศึกษาเกี่ยวกับสภาพอากาศ ในปัจจุบันระบบโกลาหลและการซิงโครไนเซชันได้รับความสนใจอย่างมากในหลายสาขา เพราะพฤติกรรมนี้สามารถพบได้ในธรรมชาติและแบบจำลองทางวิทยาศาสตร์และมีการประยุกต์ใช้งานในหลายด้านทั้งด้านวิศวกรรมและวิทยาศาสตร์ เช่น ใช้ในด้านการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลที่ใช้ในการสื่อสาร การเกิดปฏิกิริยาเคมี ระบบทางชีววิทยา และกระบวนการจัดการกับข้อมูล [2-8] เป็นต้น

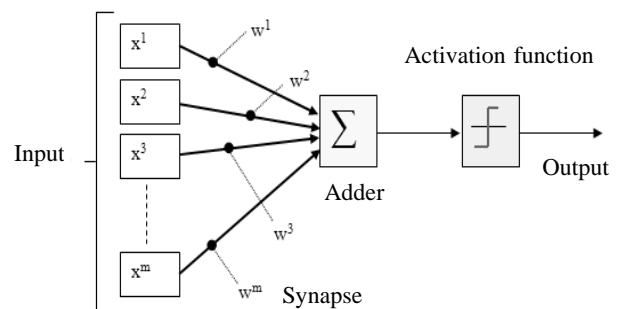
การซิงโครไนเซชันของระบบโกลาหลนั้นจะเป็นการควบคุมระบบสองระบบที่เรียกว่า ระบบมาสเตอร์และระบบสเลฟให้มีพฤติกรรมเหมือนกัน วิธีการควบคุมที่ใช้มีอยู่หลายวิธี เช่น การควบคุมแบบปรับตัวเอง [9] การควบคุมแบบพีชซีลลจิก [10] การควบคุมแบบเชิงเส้น [11] เป็นต้น

สำหรับการซิงโครไนเซชันระบบการสั่นแบบ Duffing-Holmes นั้น Loria และ Zavala-Rio [12] ใช้การควบคุมแบบแทรกคั้งอะแดพทีฟ ซึ่งก็ได้ผลลัพธ์ในการควบคุมที่ดี Yau และ Shieh [13] ใช้ตัวควบคุมแบบ พีชซีในการควบคุมการซิงโครไนซ์ และกฎการควบคุมนั้นยังทำให้ระบบมีเสถียรภาพตามทฤษฎีของลาปูนอฟอีกด้วย ในบทความนี้ได้นำเสนอวิธีการออกแบบตัวควบคุมชนิดโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับควบคุมการซิงโครไนเซชันของระบบโกลาหลชนิด Duffing-Holmes โดยที่ตัวควบคุมเป็นโครงข่ายประสาทเทียมชนิดป้อนไปข้างหน้า มีชั้นซ่อนภายในหนึ่งชั้น กระบวนการสอนตัวควบคุมใช้วิธีแบบจำลองอ้างอิง ผลลัพธ์ของการควบคุมแสดงด้วยการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์

2. โครงข่ายประสาทเทียม

ระบบโครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการทำงานของเซลล์ประสาทในสมองของมนุษย์ เกิดจากการนำเซลล์ประสาทเทียมที่เป็นหน่วยประมวลผลขนาดเล็กมาต่อกันเป็นโครงข่ายที่มีความซับซ้อนมากขึ้น ทำให้มีความสามารถในการประมวลผลข้อมูลคราวละมากๆ ได้ และมีลักษณะการทำงานที่คล้ายคลึงกับสมองคือ มีความสามารถในการเรียนรู้ และสามารถปรับตัวเองเพื่อจดจำข้อมูลที่ได้รับ [14]

โครงสร้างหลักของเซลล์ประสาทเทียมประกอบด้วย synapse, adder, activation function ดังรูปที่ 1 โดยแต่ละส่วนประกอบมีหน้าที่และหลักการการทำงานคือ synapse จะเป็นตัวเชื่อมต่อระหว่างเซลล์หลายๆเซลล์ ทำหน้าที่รับสัญญาณเข้ามาแล้วคูณด้วยค่าถ่วงน้ำหนักของตัวเองเพื่อปรับขนาดของสัญญาณให้เหมาะสม จากนั้น adder จะทำหน้าที่รวมสัญญาณที่ได้รับมาจาก synapse แล้วส่งต่อไปยัง activation function ซึ่งทำหน้าที่ประมวลผลสัญญาณและปรับสัญญาณอีกครั้งก่อนที่จะส่งสัญญาณนั้นไปสู่เซลล์ประสาทเทียมตัวอื่นต่อไป ส่วนกระบวนการเรียนรู้และปรับตัวเองของเซลล์ประสาทเทียมนั้นทำได้โดยการปรับค่าถ่วงน้ำหนักของ synapse ในบทความนี้ใช้วิธีการแพร่กลับ (backpropagation) [14] ในการปรับค่าถ่วงน้ำหนัก



รูปที่ 1 แสดงโครงสร้างของเซลล์ประสาทเทียม

ในทางวิศวกรรมระบบโครงข่ายประสาทเทียมถูกนำไปใช้อย่างกว้างขวาง เช่น ใช้ควบคุมระบบป้องกันการสั่นสะเทือนของยานพาหนะ [15] ใช้ควบคุมการ

ปรับมุมพิกซ์ของใบกังหันลมสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า [16] ควบคุมการทำงานของเครื่องยนต์เทอร์โบเจ็ตของเครื่องบิน [17] เป็นต้น ซึ่งระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่นำไปใช้งานนั้นมีหลายประเภท เช่น Recurrent, Radial Basis Function, Differential, Cellular และที่นิยมและใช้ในบทความนี้เป็นแบบป้อนไปข้างหน้า (Feedforward) ซึ่งประกอบด้วย ชั้นข้อมูลขาเข้า ชั้นซ่อน (hidden layer) ชั้นข้อมูลขาออก โดยที่ $[x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ เป็นเวกเตอร์ข้อมูลขาเข้า $[y_1, y_2, \dots, y_m]^T$ เป็นเวกเตอร์ข้อมูลขาออก ตัวอย่างโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่ประกอบด้วยหนึ่งชั้นซ่อนแสดงในรูปที่ 2 และสามารถอธิบายได้ด้วยสมการ

$$y = \sigma(W^T (V^T x + a) + b) \quad (1)$$

โดย

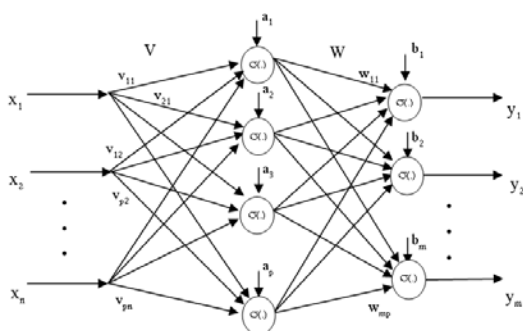
$W = [W_{ji}]$ เป็นเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นข้อมูลขาออก

$V = [V_{ji}]$ เป็นเมทริกซ์ค่าถ่วงน้ำหนักของชั้นซ่อน

$b = [b_1, b_2, \dots, b_m]^T$ เป็นไบแอสเวกเตอร์ของชั้นข้อมูลขาออก

$a = [a_1, a_2, \dots, a_p]^T$ เป็นไบแอสเวกเตอร์ของชั้นซ่อน

$\sigma(\bullet)$ เป็นเวกเตอร์ของฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function)



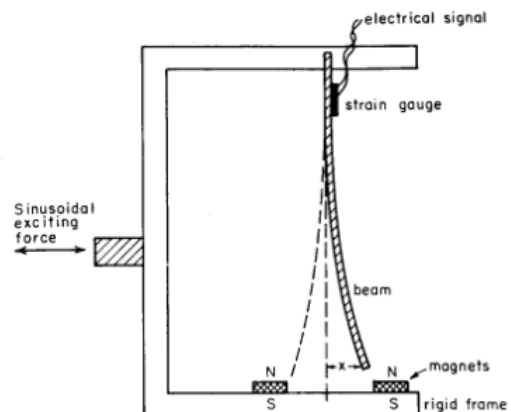
รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างระบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า

3. การสั่นแบบ Duffing – Holmes

การสั่นสะเทือนแบบ Duffing-Holmes เป็นพฤติกรรมแบบไม่เชิงเส้นที่พบได้ในระบบทางฟิสิกส์วิศวกรรม และชีววิทยา แบบจำลองนี้สามารถเขียนอยู่ในรูปสมการ [18]

$$\ddot{x} + \delta \dot{x} - \beta x + x^3 = \gamma \cos \omega t \quad (2)$$

ซึ่งเป็นสมการของแบบจำลองของการสั่นสะเทือนโดยใช้แรงภายนอกกระทำต่อคานแบบคานย่นที่อยู่ในสนามแม่เหล็กที่ไม่คงตัวของแม่เหล็กสองอัน ดังรูปที่ 3 โดยที่ตัวแปร x คือตำแหน่งของปลายคาน γ คือขนาดของแรงภายนอกที่มากระทำ ω คือความถี่ของแรงภายนอก δ คือสัมประสิทธิ์ความหน่วงของสปริง และ β คือค่าคงที่ของความแข็ง

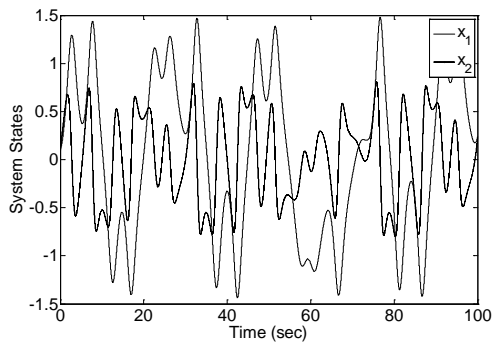


รูปที่ 3 แสดงระบบทางกลของการสั่นสะเทือนแบบ Duffing-Holmes

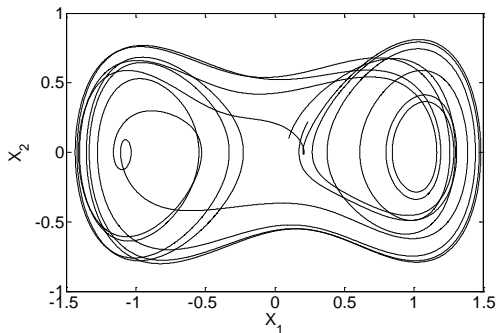
จากสมการ (2) สามารถเขียนในรูปของสมการสถานะโดยกำหนดให้ $x_1 = x$ และ $x_2 = \dot{x}$ ได้ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2 \\ \dot{x}_2 &= -\delta x_2 + \beta x_1 - x_1^3 + \gamma \cos \omega t \end{aligned} \quad (3)$$

และมีพฤติกรรมที่เป็นแบบระบบโกลาหลดังตัวอย่างในรูปที่ 4



(ก)



(ข)

รูปที่ 4 แสดงพฤติกรรมของระบบโกลาหลแบบ Duffing-Holmes

จากสมการ (3) สามารถเขียนแยกเป็นระบบมาสเตอร์ และระบบสเลฟ โดยที่ u คือสัญญาณควบคุม ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_{m1} &= x_{m2} \\ \dot{x}_{m2} &= -\delta x_{m2} + \beta x_{m1} - x_{m1}^3 + \gamma \cos \omega t \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \dot{x}_{s1} &= x_{s2} \\ \dot{x}_{s2} &= -\delta x_{s2} + \beta x_{s1} - x_{s1}^3 + \gamma \cos \omega t + u \end{aligned} \quad (5)$$

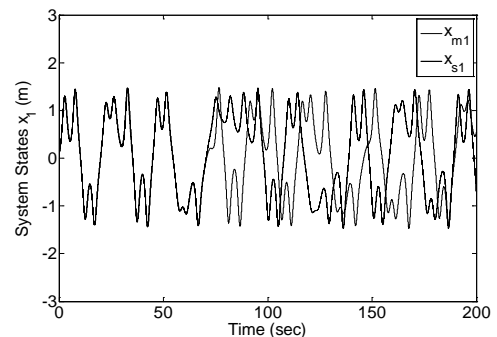
เนื่องจากระบบการสั่นแบบ Duffing-Holmes ถือว่าเป็นระบบแบบโกลาหล ซึ่งมีคุณสมบัติอย่างหนึ่งคือมีความไวต่อค่าเริ่มต้นสูง ดังรูปที่ 5 ซึ่งแสดงพฤติกรรมของระบบมาสเตอร์และสเลฟที่มีค่าเริ่มต้นต่างกันเพียงเล็กน้อยและยังไม่ได้มีการควบคุมให้มีพฤติกรรมเหมือนกัน จะเห็นได้ว่าผลของความแตกต่างเพียงเล็กน้อยในตอนเริ่มต้น จะส่งผลให้พฤติกรรมของสองระบบแตกต่างกันโดยสิ้นเชิงเมื่อเวลาผ่านไป

4. การซิงโครไนเซชัน

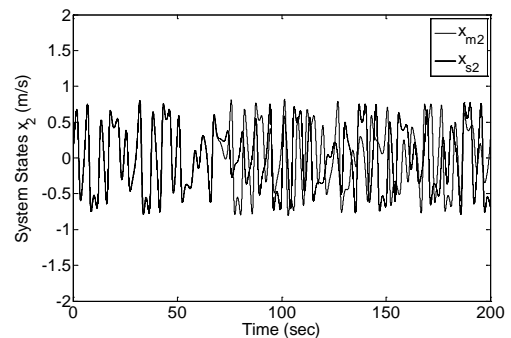
การซิงโครไนเซชันระบบโกลาหลสองระบบ ระบบหนึ่งเรียกว่าระบบมาสเตอร์หรือระบบขับ และอีกระบบเรียกว่าระบบสเลฟหรือระบบตอบสนอง การควบคุมการซิงโครไนเซชันก็คือการควบคุมที่นำ state ของระบบขับไปใช้ควบคุมระบบตอบสนองเพื่อให้มีผลตอบสนองของระบบเหมือนกับระบบขับนั่นเอง ในการออกแบบตัวควบคุมสำหรับควบคุมการซิงโครไนเซชันระบบโกลาหลนั้นจะกำหนดค่าผลต่างของการซิงโครไนเซชันคือ $e_1 = x_{s1} - x_{m1}$, $e_2 = x_{s2} - x_{m2}$ จากสมการที่ (4) และ (5) จะได้สมการสถานะของผลต่างของการซิงโครไนเซชันดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{e}_1 &= e_2 \\ \dot{e}_2 &= \beta e_1 - \delta e_2 - (x_{s1}^3 - x_{m1}^3) + u \end{aligned} \quad (6)$$

ดังนั้นในการออกแบบตัวควบคุมต้องทำให้ค่าผลต่างของการซิงโครไนเซชันลู่เข้าหาศูนย์



(ก)

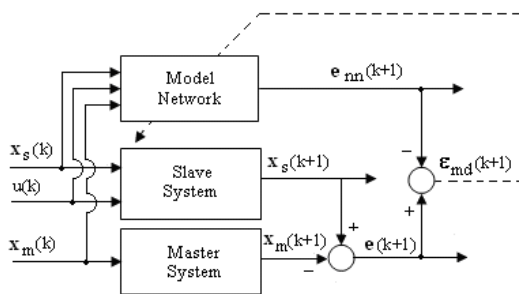


(ข)

รูปที่ 5 แสดงพฤติกรรมของระบบโกลาหลแบบ Duffing-Holmes สองระบบก่อนการควบคุม

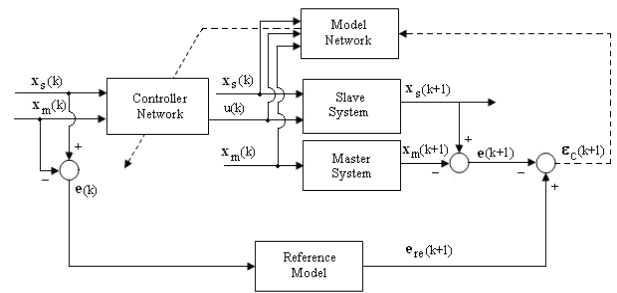
5. การออกแบบตัวควบคุม

การออกแบบตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการชิงโครโนเซชันในบทความนี้จะใช้วิธีแบบจำลองอ้างอิง (model reference) ซึ่งมี 2 ขั้นตอน คือ เริ่มแรกต้องทำการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมเลียนแบบพฤติกรรมของระบบที่จะทำการควบคุมก่อน เรียกว่าการฝึกสอนระบบเสมือน (emulator) ดังรูปที่ 6 โดยที่ x_m คือเวกเตอร์สถานะของระบบมาสเตอร์ x_s คือเวกเตอร์สถานะของระบบสเลฟ u คือสัญญาณควบคุม e, e_{nn} คือค่าผลต่างของการชิงโครโนเซชันและค่าผลต่างจากระบบเสมือนตามลำดับ ในกระบวนการฝึกสอนระบบเสมือนจะนำค่า ε_{md} ซึ่งเป็นผลต่างระหว่าง e และ e_{nn} ไปปรับค่าถ่วงน้ำหนักของโครงข่ายประสาทเทียมโดยใช้วิธีการแพร่กลับ

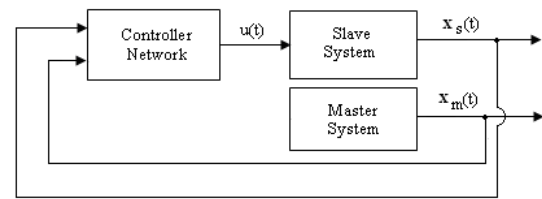


รูปที่ 6 แสดงวิธีการฝึกสอนระบบเสมือน

หลังจากนั้นนำระบบเสมือนที่ฝึกสอนได้ดีแล้วไปฝึกสอนตัวควบคุมต่อโดยมีสัญญาณขาออกจากระบบอ้างอิงเป็นเป้าหมายในการฝึกสอนตัวควบคุม ดังรูปที่ 7 โดยที่ e_{re} คือค่าผลต่างที่ได้จากระบบอ้างอิง ในกระบวนการฝึกสอนตัวควบคุม จะใช้วิธีการแพร่กลับผ่านทั้งระบบเสมือนและตัวควบคุม แต่การปรับค่าถ่วงน้ำหนักจะปรับเฉพาะของตัวควบคุมเท่านั้น เมื่อฝึกสอนตัวควบคุมได้ดีแล้วจึงนำไปควบคุมระบบสเลฟให้มีพฤติกรรมเหมือนระบบมาสเตอร์ ดังรูปที่ 8 ข้อดีของการออกแบบตัวควบคุมด้วยวิธีนี้คือ ใช้ตัวควบคุมเพียงตัวเดียวในการควบคุมระบบที่ไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 7 แสดงวิธีการสอนตัวควบคุม

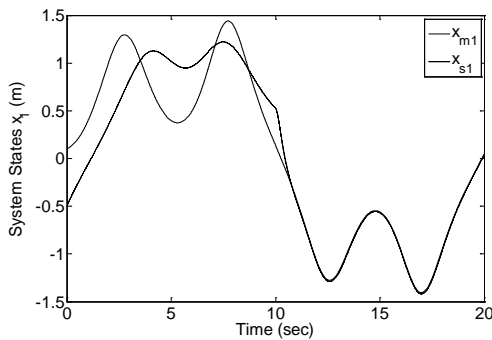


รูปที่ 8 แสดงการนำตัวควบคุมไปใช้ชิงโครโนเซชัน

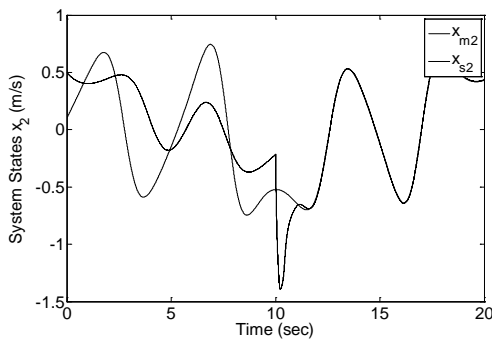
6. ผลลัพธ์

ในบทความนี้ใช้การจำลองในคอมพิวเตอร์เพื่อแสดงความสามารถของตัวควบคุม โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ในสมการการสั่นแบบ Duffing-Holmes ดังนี้ $\delta = 0.25$, $\beta = 1$, $\gamma = 0.3$, $\omega = 1$ ใช้ข้อมูลในการฝึกสอนระบบเสมือนจำนวน 5 ชุด แต่ละชุดประกอบด้วย $x_{m1}, x_{m2}, x_{s1}, x_{s2}, u$ และแต่ละชุดมี 2000 ข้อมูล ใช้ sampling time เท่ากับ 0.005 วินาที โดยระบบเสมือนมีโครงสร้างเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้า มีชั้นซ่อนภายในหนึ่งชั้น ฟังก์ชันกระตุ้นเป็นแบบไฮเปอร์โบลิกแทนเจนต์ การปรับค่าถ่วงน้ำหนักใช้วิธีการแพร่กลับมาตรฐาน ส่วนการฝึกสอนตัวควบคุมสำหรับการชิงโครโนเซชันระบบ Duffing-Holmes สองระบบนั้นใช้ข้อมูล จำนวน 4 ชุด ประกอบด้วย $x_{m1r}, x_{m2r}, x_{s1r}, x_{s2r}$ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ใช้คำนวณหาเอาท์พุทของแบบจำลองอ้างอิง เพื่อใช้เป็นเป้าหมายของการฝึกสอน แต่ละชุดประกอบด้วยข้อมูลจำนวน 2000 ข้อมูล และใช้ sampling time เท่ากับ 0.005 วินาที และกำหนดระบบจำลองอ้างอิงให้เป็นระบบอนุพันธ์เชิงเส้นอันดับสอง มีค่าอัตราส่วนความหน่วง (damping ratio) 0.8 และค่าเวลาสงบ (settling time) เป็น 1 วินาที ส่วนตัว

ควบคุมมีโครงสร้างเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบ
ป้อนไปข้างหน้า มีชั้นซ่อนภายในหนึ่งชั้น ฟังก์ชัน
กระตุ้นของชั้นซ่อนเป็นแบบไฮเพอร์โบลิกแทนเจนต์
และของชั้นข้อมูลขาออกเป็นแบบเชิงเส้น
กระบวนการเรียนรู้และการปรับค่าถ่วงน้ำหนักใช้
หลักการแพร่กลับเช่นเดียวกับการฝึกสอนระบบ
เสมือน เมื่อนำตัวควบคุมที่ฝึกสอนดีแล้วไปควบคุม
ระบบสองระบบดังรูปที่ 8 และในรูปที่ 9 แสดงผลลัพธ์
ของการควบคุมการซิงโครไนเซชัน โดยเริ่มควบคุมที่
เวลา 10 วินาที กำหนดค่าเริ่มต้นของระบบมาสเตอร์
และสเลฟคือ $x_{m1}(0) = 0.1$, $x_{m2}(0) = 0.1$,
 $x_{s1}(0) = -0.5$, $x_{s2}(0) = 0.5$ ในรูปที่ 10 แสดงค่า
ผลต่างของการซิงโครไนเซชัน ซึ่งพบว่าตัวควบคุม
สามารถควบคุมระบบสเลฟให้มีผลตอบสนอง
เหมือนกับระบบมาสเตอร์ได้ และค่าผลต่างของการ
ซิงโครไนเซชันลู่เข้าหาศูนย์ตามที่ต้องการ

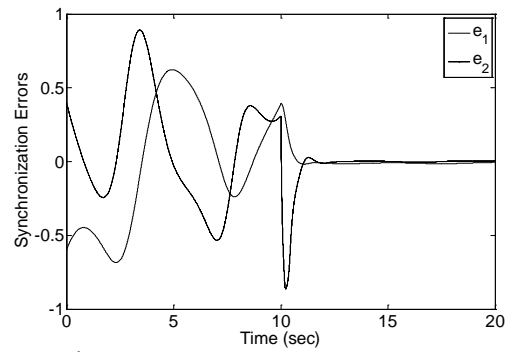


(ก)



(ข)

รูปที่ 9 แสดงผลลัพธ์ของการควบคุมการ
ซิงโครไนเซชัน

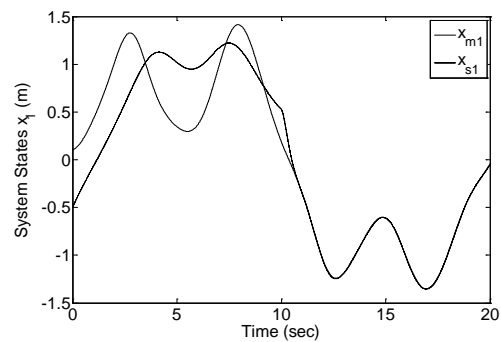


รูปที่ 10 แสดงค่าผลต่างของการซิงโครไนเซชัน

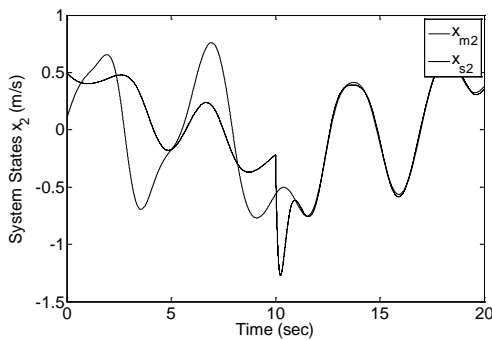
นอกจากนี้ในบทความนี้ยังทำการทดสอบความ
คงทนของตัวควบคุมที่ออกแบบมาควบคุมการซิงโคร
ไนเซชันในกรณีที่ระบบมาสเตอร์ถูกสัญญาณรบกวน
กำหนดให้สัญญาณรบกวนคือ $d(t) = 0.2 \cos(\pi t)$
ดังนั้นเขียนสมการสถานะของระบบมาสเตอร์ใหม่ดังนี้

$$\begin{aligned} \dot{x}_{m1} &= x_{m2} \\ \dot{x}_{m2} &= -\delta x_{m2} + \beta x_{m1} - x_{m1}^3 + \gamma \cos \omega t + d(t) \end{aligned} \quad (7)$$

ผลลัพธ์ของการควบคุมในกรณีที่ระบบมาสเตอร์ถูก
รบกวนแสดงดังรูปที่ 11 และผลต่างของการซิงโครไน
เซชันแสดงดังรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าตัวควบคุมแบบ
โครงข่ายประสาทเทียมที่ออกแบบมาก่อนหน้านี้ยัง
สามารถควบคุมการซิงโครไนเซชันได้อยู่ถึงแม้ว่า
ระบบจะถูกสัญญาณรบกวน แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุม
มีความคงทนต่อการเปลี่ยนแปลง

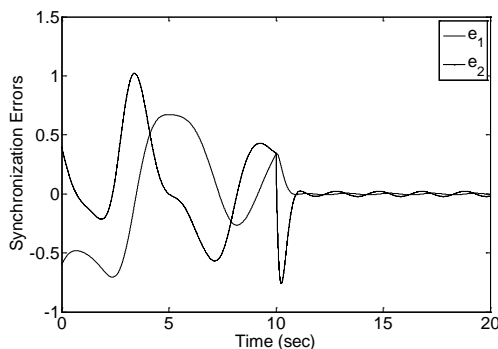


(ก)



(ข)

รูปที่ 11 แสดงผลลัพธ์ของการควบคุมการซิงโครไนเซชันในกรณีที่มีสัญญาณรบกวน



รูปที่ 12 แสดงค่าผลต่างของการซิงโครไนเซชัน

7. สรุปและข้อเสนอแนะ

ในบทความนี้ได้ออกแบบตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับการควบคุมการซิงโครไนเซชันของระบบการสั่นแบบ Duffing-Holmes ซึ่งถือว่าเป็นระบบโกลาหลชนิดหนึ่ง โดยกระบวนการฝึกสอนใช้วิธีแบบจำลองอ้างอิงและการปรับค่าถ่วงน้ำหนักใช้วิธีการแพร่กลับ ผลลัพธ์ของการควบคุมแสดงด้วยการจำลองในคอมพิวเตอร์ แสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมแบบโครงข่ายประสาทเทียมสามารถควบคุมการซิงโครไนเซชันให้เป็นไปตามแบบจำลองอ้างอิงที่ต้องการได้ และใช้ตัวควบคุมเพียงแค่ตัวเดียวเท่านั้นในการควบคุม นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่าตัวควบคุมยังสามารถทำงานได้ตามที่ต้องการในกรณีที่มีระบบมาสเตอร์ถูกรบกวนอีกด้วย

อย่างไรก็ตามผลลัพธ์ของการซิงโครไนเซชันระบบ Duffing-Holmes ที่นำเสนอในบทความนี้เป็นเพียงการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เท่านั้น ไม่ได้มีการพิสูจน์เสถียรภาพของตัวควบคุมในทางทฤษฎี ซึ่งผู้วิจัยมีข้อเสนอแนะให้ต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมต่อไป ตลอดจนทำการเปรียบเทียบผลลัพธ์กับวิธีการควบคุมแบบอื่นๆ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] Lorenz Edward (1993). *The Essence of Chaos*, The University of Washington, Press
- [2] P. Colet, R. Roy (1994). Digital communication with synchronization of chaotic laser, *Optics Letter* 19, pp. 2056-2058
- [3] T. Sugawara, M. Tachikawa, T. Tsykamoto, T. Shimizy (1994). Observation of synchronization in laser chaos, *Physical Review Letter*, 72, pp. 3502-3505
- [4] Renato E. Mirollo, Steven H. strogatz (1990). Synchronization of pulse couple biological oscillator, *SIAM Journal on Applied Mathematics* 50(6), pp. 1645-1662
- [5] Alsing P. M, Gavrielides A, Kovanis V, Roy R, Thornburg K S (1997). Encoding and decoding messages with chaotic laser, *Physical Review E* 56, pp. 6302-6310
- [6] Her-Terng Yau, Cheng-Shion Shich (2008), Chaos synchronization using fuzzy logic controller, *Nonlinear Analysis : Real World Application* 9, pp. 1800-1810
- [7] Erik Mosekilde, Yuri Maistrenko, Dmitry Postnov (2002), *Chaotic synchronization application to living system: Nonlinear series A Vol. 42*, World Scientific, Singapore

- [8] E. Scholl, H. G. Schuster (2008), Handbook of Chaos Control, Second Completely Revised and Enlarged Edition, Wiley-VCH, Germany
- [9] Xiaobing Zhou, Yue Wu, Yi Li, Hongquan Xue (2009). Adaptive control and synchronization of a new modified hyperchaotic Lu system with uncertain parameter, *Chaos Solitons and fractal* 39, pp. 2477-2483
- [10] Chian-Song Chiu, Tung-Sheng Chiang, and Peter Liu (2001). LMI-Based Fuzzy Chaotic Synchronization and Communication. *IEEE transactions on fuzzy systems*, vol. 9, no. 4, august 2001, pp. 539-553
- [11] Hua Wang, Zhengzhi Han, Wei Zhang, Qiyue Xie (2009). Chaos control an synchronization of unified chaotic system via linear control, *Journal of Sound and Vibration*, 320, pp. 365-372
- [12] Loria, A., Zavala-Rio, A. (2007), Adaptive tracking control of chaotic systems with application to synchronization, *IEEE Transaction on Circuits and System-I: Regular Paper*, 54(9), pp.2019-2029
- [13] Yau, H.-T., Shieh, C.-S. (2008), Chaos Synchronization using Fuzzy Logic Controller, *Nonlinear Analysis: Real World Application*, 9, pp. 1800-1810
- [14] Simon Haykin (1999), *Neural networks A Comprehensive Foundation 2nd edition*, New Jersey, Prentice-Hall, Inc
- [15] Ikbal Eski, Sahim Yildirim (2009). Vibration control of vehicle active suspension system using a new robust neural network control system, *Simulation Modeling Practice and Theory*, 17, pp. 778-793
- [16] Ahmet Serdar Yilmaz, Zafer Ozer (2009). Pitch angle control in wind turbines above the rated wind speed by multi-layer perceptron and radial basis function neural network, *Expert System with Applications*, 36, pp. 9769-9775
- [17] Ma Jing (2006). Adaptive Control of the aircraft turbojet engine based on neural network, *Computational Intelligence and Security International Conference on Volume 1*, Nov 2006, pp. 937-940
- [18] J. Guckenheimer, P. Holmes (1983). *Nonlinear Oscillations, Dynamical system and Bifurcations of Vector Field*, Springer, New York